

УДК 621.91:536.2

Ю.Г. Кравченко, канд. техн. наук, Дніпропетровськ, Україна

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОТИ
ДЕФОРМАЦІЇ В ПЛОЩИНІ ЗСУВУ І ТЕМПЕРАТУРИ
НА ПОВЕРХНІ РІЗАННЯ**

Отримані розрахункові формули коефіцієнта розподілу теплоти первинної деформації між стружкою і заготовкою та залишкової температури на поверхні різання від швидкорухомого джерела теплоти деформації на основі теплофізичної моделі проникнення теплового потоку в заготовку перед умовною площиною зсуву.

Получены расчетные формулы коэффициента распределения теплоты первичной деформации между стружкой и заготовкой и остаточной температуры на поверхности резания от быстродвижущегося источника теплоты деформации на основе теплофизической модели проникновения теплового потока в заготовку перед условной плоскостью сдвига.

Calculating formula of coefficient of heat distribution of primary deformation between chip and workpiece, and residual temperature on transient surface from fast-moving source of deformation heat based on thermophysical model of penetration of heat flux into workpiece before conditional shear plane have been obtained.

Вступ

Температура різання пов'язана з системою теплообмінів між заготовкою, лезом і стружкою. Складність механотермічних явищ при різанні породжує різні підходи до рішення ключової задачі визначення коефіцієнта розподілу b^* теплоти деформації в умовній площині зсуву P_ϕ між стружкою і заготовкою.

Розрахунок у А.Н. Резникова [1, 2] ґрунтується на рівності температур стружки і заготовки в площині P_ϕ відповідно від дії плоского безперервного джерела (ПБД) з густиною $b^* \cdot q_s$ (q_s – густина тепловиділення в площині P_ϕ) і швидкорухомого джерела (ШРД) густиною $(1 - b^*)q_s$. При виводі найбільш розповсюдженої формули

$$b^* = 1 / \left(1 + 1.33 \frac{ka \cdot \sqrt{\sin \phi}}{\sqrt{Pe}} \right)$$

(тут $Pe = a \cdot V / \omega$ – критерій Пекле, a – товщина зрізу, V – швидкість різання, ω – коефіцієнт температуропровідності, ϕ – кут зсуву, ka – коефіцієнт потовщення стружки) була прийнята розрахункова схема без

спільної площини контактування торця стружки зі сторони площини P_ϕ з площиною різання P_n (допущено знехтування кутом нахилу площини P_ϕ до площини P_n).

Відомі розрахунки С.С. Сіліна базуються на початкову виразу температурного поля заготовки від нахиленого до площини P_n смугового ШРД (без виводу) /3/, згідно якого температура деформації в площині P_ϕ має зростання в напрямку різальної кромки. Аналіз адекватності аналітико-емпіричного виразу із рівності механічної і теплової енергії на межі розділу заготовка-стружка /4/ показав також невідповідне завищення коефіцієнта b^* .

$$b^* = 1/(1 + b_2) \quad \text{з} \quad b_2 = 4,25/(Pe \cdot \operatorname{tg} \phi)^{1,2}$$

Проблемною залишається і задача вдосконалення розрахунку температурного поля на площині P_n . Пов'язану з ним залишкову температуру на довжині ділянки поверхні різання R за перетином її площиною P_ϕ , рівній величині зносу h по задній поверхні A_α леза, в більшості випадків /2/ приймають за значення температури деформації в тій же площині зсуву P_ϕ .

Обидві основні методики містять часткові відступлення від реальних фізичних моделей і побудовані на початкових /1, 3/ математично складних розрахунках, що вказує на актуальність уточнення і спрощення рішення цих проблемних задач.

Мета роботи полягає в виводі достовірних формул для розрахунку коефіцієнта розподілу теплоти деформації в площині зсуву і потім залишкової температури на поверхні різання позаду основної площини на строгій теплофізичній основі.

Постановка задачі

Згідно загальноприйнятої схеми стружкоутворення рис. 1 (розділення по площині різання P_n двох потоків металу в стружку C_γ і заготовку 3_α , трансформування паралелограма $omsp \rightarrow oms'p'$ на площині зсуву P_ϕ , перебільшення швидкості різання V над швидкістю збігу стружки V_c) фактично маємо теплофізичну модель пошарового проходження потоку C_γ через нахилену площину P_ϕ (з ПБД теплоти деформації) в перпендикулярному до неї напрямку з швидкістю $V_n = V \cdot a/l_s = V \cdot \sin \phi$ (l_s – довжина площини P_ϕ). Після площини P_ϕ стружка відхиляється передньою поверхнею A_γ від напрямку V_n і повторно нагрівається від ШРД тертя із швидкістю $V_c > V_n$.

Основою рішення поставленої задачі служили два положення з теорії теплопровідності.

1. Для нагріву тіла масою m і питомою теплоємністю матеріалу c до температури θ необхідна кількість теплоти $Q = m \cdot c \cdot \theta$ (Дж), звідки з урахуванням густини матеріалу ρ і об'єма тіла ω_m знаходимо

$$\theta = Q / (c \cdot \rho \cdot \omega_m). \quad (1)$$

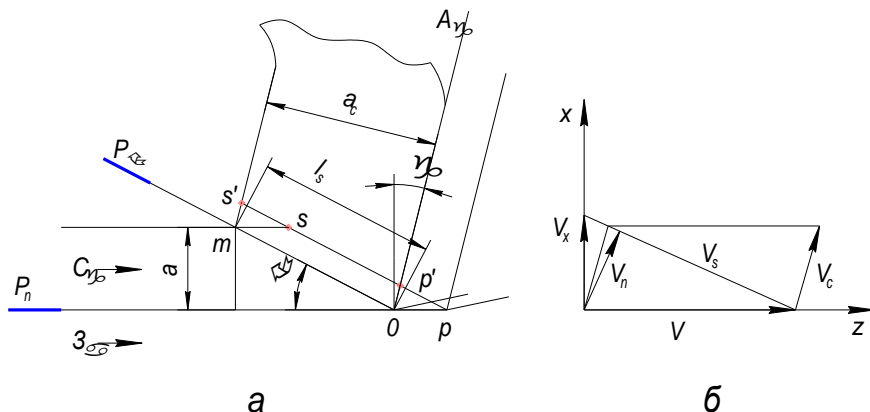


Рисунок 1 – Схема стружкоутворення: **а** – геометричні параметри процесу; **б** – план швидкостей

Якщо в площині $n = 0$ діє ПБД теплоти густиною $q_{n\phi}$ (Вт/м²) і через цю площину рухається середовище (стержень), то температура в точці n згідно Г.С. Карслоу, Д.К. Єгера /6/ і С.С. Сіліна /7/ записується наступним чином

$$\theta_n = \frac{q_{n\phi}}{(c \cdot \rho) \cdot V_n} e^{-\frac{n \cdot V_n}{\omega}}, \quad n > 0. \quad (2)$$

Вираз $\exp(-n \cdot V_n / \omega)$ завжди менший одиниці. Чим більша швидкість потоку метала C_γ по вісі n , тим швидше знижується температура заготовки перед площиною P_ϕ .

Основна частина

1. Вивід формули розрахунку коефіцієнта розподілу b^* теплоти деформації.

Під дією ПБД теплоти зі сторони площини зсуву P_ϕ об'ємна (середня) температура стружки (контртіла у вигляді стержня) через потужність тепловиділення $Q_s = F_s \cdot V_s$ (F_s і V_s – дотична сила і швидкість зсуву), інтенсивність зйому оброблюваного матеріалу $W = a_c \cdot b \cdot V_c$ (a_c і b – товщина і ширина стружки) і коефіцієнт поглинання теплоти стружкою b^* буде відповідно (1) дорівнювати $\theta_c = b^* \cdot Q_s / (c\rho) \cdot a_c \cdot b \cdot V_c$.

Після заміни $a_c \cdot V_c = a \cdot V$, $a = l_s \cdot \sin \phi$, $Q_s / l_s \cdot b = \tau_s \cdot V_s = q_s$ (τ_s – дотична напружка зсуву) і $c\rho = \lambda / \omega$ (λ і ω – коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу заготовки) отримуємо розрахункову формулу

$$\theta_c = b^* \cdot q_s \cdot \omega / (\lambda \cdot V \cdot \sin \phi). \quad (3)$$

Характерно, що температура θ_n (2) при $n = 0$ досягає максимуму і дорівнює температурі зони деформації (стружки) $\theta_s = \theta_c$ (3).

Розрахункову модель на основі виразу (2) приймаємо по аналогії зі схемою розрахунку температури для плоского під кутом $\phi - \gamma < 30^\circ$ ШРД в стержні /1/ в момент приходу джерела q_s в площину P_ϕ без урахування незначного відводу теплоти в боковому напрямку нормальній швидкості V_n /5/ на ділянці mm' по рис. 2 (поглинання теплового потоку перерізом $n'o'o'$ розглянуто нижче).

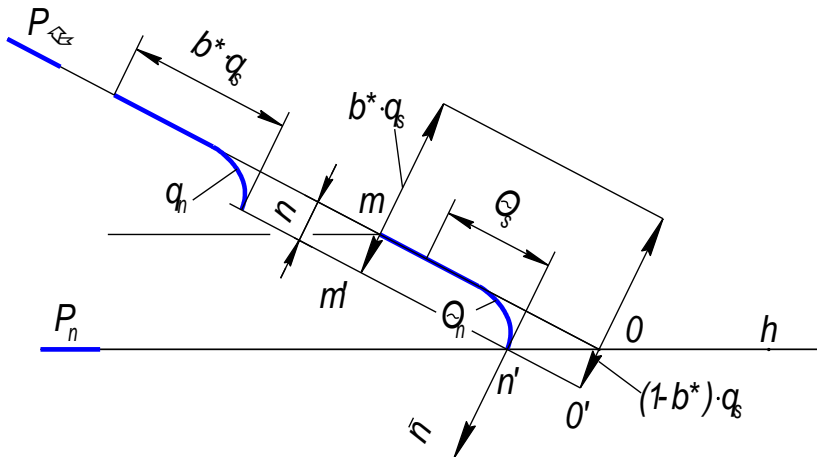


Рисунок 2 – Схема розподілу густини теплопоглинання q_n заготовкою і відповідної температури θ_n перед площиною зсуву P_ϕ

На основі диференційного рівняння Фур'є $q = -\lambda \cdot \partial \theta / \partial n$ густина поглинання заготовкою частки теплоти деформації в площині P_ϕ визначається як первісна розподілу (2)

$$q_n = -\lambda \cdot \theta_s \left(-\frac{V_n}{\omega} \right) \exp \left(-\frac{n \cdot V_n}{\omega} \right). \quad (4)$$

В свою чергу також із залежності (2) при значенні $\theta_n = 1^\circ$ вираховується глибина n проникнення теплового потоку в заготовку (рис. 2)

$$\ln 1 = \ln \theta_s - n \cdot V_n / \omega,$$

звідки з урахуванням рівності $\theta_s = \theta_c$ (3) знаходимо

$$n = \frac{\omega}{V \cdot \sin \phi} \cdot \ln \frac{b^* \cdot q_s \cdot \omega}{\lambda \cdot V \cdot \sin \phi}. \quad (5)$$

Середньоінтегральне значення функції розподілу q_n (4) по глибині n (5)

$$F_n = \frac{1}{n} \int_0^n e^{-\frac{n_1 \cdot V_n}{\omega}} \cdot dn_1 = \frac{\omega}{n \cdot V_n} (1 - e^{-\frac{n \cdot V_n}{\omega}}). \quad (6)$$

визначає середню величину густини теплопоглинання заготовкою, котра із умови $b^* \cdot q_s$ (3) відповідає частці надходження теплового потоку в заготовку в рівнянні

$$\lambda \cdot \theta_s \cdot \frac{V_n}{\omega} \cdot F_n = (1 - b^*) \cdot q_s. \quad (7)$$

Після підстановки виразів θ_s (3), F_n (6) в рівняння (7) і скорочення параметрів q_s і λ отримуємо пошукову формулу

$$b^* = 1 / \left[1 + \frac{\omega}{n \cdot V_n} \left(1 - e^{-\frac{n \cdot V_n}{\omega}} \right) \right]. \quad (8)$$

Вхідна в (8) глибина n (5) підбирається методом ітерацій по наближенню значення коефіцієнта b^* .

Попередньо для першої ітерації була отримана спрощена залежність по орієнтовному значенню коефіцієнта розподілу b' на основі умовної моделі роботи клина з кутом підйому ϕ по переміщенню стержня по нахилений під кутом γ площині A_γ (елементи рис. 1). В результаті силового ходу повзуна

(поток зрізуваного шару C_γ) на довжину op відбувається переміщення стержня (стружки) по напрямній A_γ на відстань op' з тепловиділенням на спільній поверхні тертя (площині P_ϕ). Зі сторони торця стержня приймалося ПБД густиною $b' \cdot q_s$, а з контактної сторони клина – смугове ШРД з густиною $(1 - b') \cdot q_s$ і швидкістю V_s .

Рівність контактних температур тертя /8/ від ПБД (3) і ШРД по формулі /2/ з коефіцієнтом форми джерела k_g призводить до залежності

$$\theta_{mi} = \frac{(1 - b') \cdot q_s \cdot k_g \cdot \sqrt{l_s \cdot \omega}}{\lambda \sqrt{\pi \cdot V_s}}$$

$$b' = 1 / \left[1 + \frac{\sqrt{\pi}}{k_g} \sqrt{\frac{\omega \cdot \cos \gamma}{a \cdot V \cdot \sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)}} \right]$$

або з введенням критерію Pe і $k_g = 1,333$ при рівномірному розподіленню q_s

$$b' = \frac{1}{1 + 1,329 \sqrt{\frac{\cos \gamma}{Pe \cdot \sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)}}}. \quad (9)$$

Після заміни n на вираз (5) з урахуванням b' (9) і виключення $\exp(-n \cdot V_n / \omega) \rightarrow 0$, зважаючи на малі значення при існуючих умовах процесу різання, формула (8) приймає розрахунковий вигляд

$$b^* = 1 / \left[1 + \left(\ln b' + \ln \frac{q_s \cdot \omega}{\lambda \cdot V \cdot \sin \phi} \right)^{-1} \right]. \quad (10)$$

Постійність значення b^* звичайно досягається після одного, другого цикла ітерацій.

2. Розрахунок температури на поверхні різання R заготовки.

В рухомій системі потоку метала \mathcal{Z}_α відносно площини P_ϕ теплові потоки ПБД деформації в напрямку вісі x густиною $b^* \cdot q_s \cdot \cos \phi$ з урахуванням впливу кута ϕ /5, 9/ перетинають площину різання P_n лише правіше т. O' (рис. 3), що призводить до деякого «насищення» теплотою ділянку $O'O$ довжиною l_z .

Решта теплоти від роботи деформації, яка поглинається шаром C_γ , розходується на «самопідігрів» зони деформації і повертається в стружку.

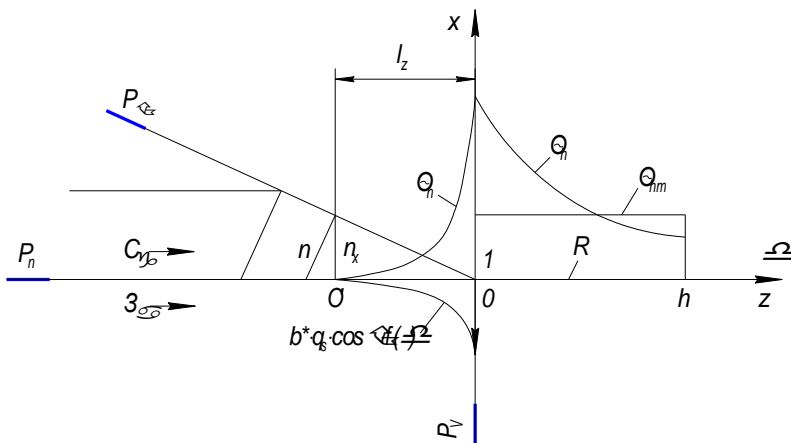


Рисунок 3 – Температурне поле на площині різання P_n заготовки:
 $O'O$ – ділянка теплопоглинання; Oh – ділянка контакту з площадкою зносу леза по задній поверхні

Істотно на ділянці $O'O$ – площини P_n маємо смугове ШРД з температурним полем $/2, 10/$

$$\theta_{cu} = \frac{q_x \cdot \sqrt{l_z \cdot \omega}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} \cdot F_{cu}, \quad (11)$$

$$\partial_e F_{cu} = \int_0^\delta \frac{f(\delta_1)}{\sqrt{\delta - \delta_1}} d\delta_1 - \text{функція розподілу температури; } \delta = z/l_z -$$

безрозмірний параметр; $f(\delta)$ – закономірність розподілу густини теплового потоку q_x .

Стосовно до ШРД в напрямку вісі z вектора V і вісі x потоку густиною q_x після заміни в (4) q_n на $q_x = q_n \cdot \cos \phi$ з тепловим потоком по нормалі до P_n , $n \cdot V_n$ в показнику степені при e на $n_x = n \cdot \cos \phi$ і $V_x = V_n / \cos \phi$ ($n_x \cdot V_x = n \cdot V_n$), вводу $1 - \delta = x/n_x$ і підстановки замість n виразу (5) отримуємо

$$q_x = b^* \cdot q_s \cdot \cos \phi \cdot e^{-(1-\delta) \cdot \ln \theta_s}. \quad (12)$$

В межах $0 < \delta < 1$ функція $f = e^{-(1-\delta)\ln\theta_s}$ змінюється від $e^{-\ln\theta_s} = 1/\theta_s$ до 1. При $\delta > 1$ показниковій функції властиве різке збільшення (наприклад, при $\delta = 2$ її значення збільшується в $e^{\ln\theta_s} = \theta_s$ раз).

Відповідно результату інтегрування /11/ функції F_{cui} (11) з $\ln \theta_s = c$ (12) знаходимо з (13) її максимальне значення в т. 0 при $\delta = 1$

$$F_{cui} = \int_0^{\delta} \frac{e^{-(1-\delta)c}}{\sqrt{\delta - \delta_1}} d\delta_1 = e^{(\delta-1)c} \int_0^{\delta} \frac{e^{-cu}}{\sqrt{u}} du = e^{(\delta-1)c} \sqrt{\frac{\pi}{c}} \operatorname{erf} \sqrt{c \cdot \delta} \quad (13)$$

$$F_{oui} = \sqrt{\frac{\pi}{\ln \theta_s}} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{\ln \theta_s} = \sqrt{\frac{\pi}{\ln \theta_s}} \cdot \Phi \sqrt{2 \cdot \ln \theta_s}. \quad (14)$$

Максимальна температура (11) з (14) дорівнює

$$\theta_{oui} = \frac{b^* \cdot q_s \cdot \cos \phi \cdot \sqrt{l_z \cdot \omega}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} \cdot F_{oui} \quad (15)$$

Дія ШРД призводить до накопичення теплоти на відрізку $O'O$ площини P_n (рис. 3). При $\delta > 1$ функція F_{cui} (13) не підлягає застосуванню.

За межею контакту з джерелом тепловиділення ($\delta > 1$) на адіабатичній поверхні ділянки $O\Box$ за рахунок теплопровідності матеріалу заготовки відбувається різке понижування температури θ_h (рис. 3). По методикі М.М. Рикаліна /5/ для періоду вирівнювання температури за межами дії ШРД температурне поле визначається різницею температур позитивного і негативного відбитих джерел по рис. 4

$$\theta_{\delta} = \theta'_{0\delta} - \theta'_{1\delta}. \quad (16)$$

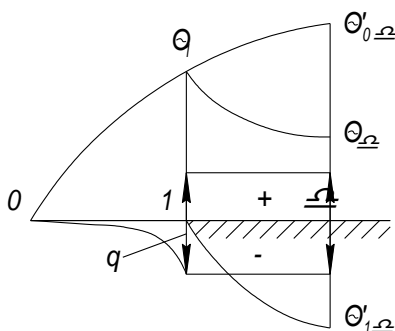


Рисунок 4 – Схема до розрахунку температури на ділянці 1δ з відбитими (фіктивними) джерелами

Тоді по аналогії з (16) при межах інтегрування $F_h = \int_0^{\delta} f(\delta) d\delta -$
 $-\int_1^{\delta} f(\delta) d\delta = \int_0^1 f(\delta) d\delta$ обчислюється значення функції температурного
 поля Oh

$$F_h = \int_0^1 e^{-(1-\delta) \cdot c} \frac{d\delta_1}{\sqrt{\delta - \delta_1}} = \sqrt{\frac{\pi}{c}} e^{(\delta-1) \cdot c} \left(\operatorname{erf} \sqrt{c\delta} - \operatorname{erf} \sqrt{c(\delta-1)} \right), \delta > 1 \quad (17)$$

з параметром $\delta = 1 + h/l_z$ (h - величина зносу леза по A_α , $l_z = n \cdot \cos \phi / \operatorname{tg} \phi$ - довжина перетину P_n по нормалі тепловим потоком від деформації в P_ϕ).

Середнє значення функції F_h (17) температурного поля «вирівнювання - охолодження» вираховується по формулі

$$\begin{aligned} F_{hm} &= \frac{1}{\delta-1} \int_1^{\delta} F_h \cdot d\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{c}(\delta-1)} \int_1^{\delta} e^{(\delta-1) \cdot c} \left(\operatorname{erf} \sqrt{c\delta} - \operatorname{erf} \sqrt{c(\delta-1)} \right) d\delta. \\ I_1 &= e^{-c} \int_1^{\delta} e^{c\delta} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{c\delta}} e^{-t^2} dt \right) d\delta = \\ &= \frac{2}{c\sqrt{\pi}} e^{-c} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{c\delta} \operatorname{erf} \sqrt{c\delta} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^c \operatorname{erf} \sqrt{c} - \sqrt{c\delta} + \sqrt{c} \right). \\ I_2 &= e^{-c} \int_1^{\delta} e^{c\delta} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{c(\delta-1)}} e^{-t^2} dt \right) d\delta = \\ &= \frac{2}{c\sqrt{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{c(\delta-1)} \operatorname{erf} \sqrt{c(\delta-1)} \right) - \sqrt{c(\delta-1)}. \\ F_{hm} &= \frac{2}{c^{1.5}(\delta-1)} \left[\sqrt{c} \left(\sqrt{\delta-1} - e^{-c}(\sqrt{\delta-1}) \right) - \right. \end{aligned}$$

$$-\frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\operatorname{erf} \sqrt{c} - e^{c(\delta-1)} \left(\operatorname{erf} \sqrt{c\delta} - \operatorname{erf} \sqrt{c(\delta-1)} \right) \right) \Bigg], \quad \delta > 1 \quad (18)$$

Після підстановки (18) в формулу $\theta_{ош}$ (15) отримуємо середнє значення температури на поверхні різання заготовки

$$\theta_{hm} = \theta_{ош} \cdot F_{hm}. \quad (19)$$

Пошукові вирази по визначенню b^* (10) і θ_{hm} (19) необхідні при вирахуванні підсумкових температур на передній і задній поверхнях леза.

Реалізація

Для прикладу розрахунку були прийняті вихідні дані [2]:

заготовка – сталь 12Х18Н9Т, $\lambda = 22,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\omega = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

умови різання – $a = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $V = 1 \text{ м}/\text{с}$, $\gamma = 15^\circ$,
 $h = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

параметри стружки утворення – $K_a = 1,8$, $\phi = 32^\circ$;

складові сили різання, $H - P_z = 2560$, $F_y = 1934$, $F_x = 55$.

Обчислення виконані по наступному алгоритму.

1. Потужність тепловиділення в площині $P_\phi/2$

$$Q_s = P_z V - \left(F_y \cdot \frac{V}{K_a} + F_x V \right) = 2560 \cdot 1 - \left(1934 \cdot \frac{1}{1,8} + 55 \cdot 1 \right) = 1460,5 \text{ Вт}$$

2. Густина джерела теплоти деформації

$$q_s = \frac{Q_s}{l_s \cdot b} = \frac{1460,5 \cdot \sin 32^\circ}{0,31 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 624,2 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

$$3. \text{ Критерій Пекле } Pe = \frac{a \cdot V}{\omega} = \frac{0,31 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{5 \cdot 10^{-6}} = 62.$$

4. Попередній коефіцієнт розподілу (9)

$$b' = \left[1 + 1,329 \sqrt{\frac{\cos \gamma}{Pe \cdot \sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)}} \right]^{-1} =$$

$$= \left[1 + 1,329 \sqrt{\frac{\cos 15^\circ}{62 \cdot \sin 32^\circ \cdot \cos(32 - 15)^\circ}} \right]^{-1} = 0.811.$$

5. Коефіцієнт розподілу першої ітерації (10)

$$b_1^* = \frac{1}{1 + \left(\ln b' + \ln \frac{q_s \cdot \omega}{\lambda \cdot V \cdot \sin \phi} \right)^{-1}} =$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\ln 0.811 + \ln \frac{624.2 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{22.6 \cdot 1 \cdot \sin 32^\circ} \right)^{-1}} = 0.843.$$

6. Коефіцієнт розподілу другої ітерації (10)

$$b_2^* = \frac{1}{1 + \left(\ln b_1^* + \ln \frac{q_s \cdot \omega}{\lambda \cdot V \cdot \sin \phi} \right)^{-1}} = \frac{1}{1 + (\ln 0,843 + 5,563)^{-1}} = 0,844.$$

7. Температура деформації (3)

$$\theta_s = \frac{b^* \cdot q_s \cdot \omega}{\lambda \cdot V \cdot \sin \phi} = \frac{0,844 \cdot 624,2 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{22,6 \cdot 1 \cdot \sin 32^\circ} = 219,9^\circ \text{C}.$$

8. Глибина проникнення теплового потоку (5)

$$n = \frac{\omega}{V \cdot \sin \phi} \cdot \ln \theta_s = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot \sin 32^\circ} \cdot \ln 219.9 = 50.868 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

9. Довжина перетинання P_n тепловим потоком q_x

$$l_z = n \cdot \cos \phi / \operatorname{tg} \phi = 50,868 \cdot 10^{-6} \cdot \cos 32^\circ / \operatorname{tg} 32^\circ = 69,032 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

10. Максимальне значення функції розподілу (14)

$$F_{out} = \sqrt{\frac{\pi}{\ln \theta_s}} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{\ln \theta_s} = \sqrt{\frac{\pi}{\ln 219.9}} \cdot \Phi \sqrt{\ln 219.9} = 0.763.$$

11. Температура на початку P_ϕ (15)

$$\theta_{ош} = \frac{b^* \cdot q_s \cdot \cos \phi \sqrt{l_z \cdot \omega}}{\lambda \sqrt{\pi \cdot V}} \cdot F_{ош} =$$

$$= \frac{0,844 \cdot 624,2 \cdot 10^6 \cdot \cos 32^\circ \sqrt{69,032 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}}{22,6 \sqrt{\pi \cdot 1}} \cdot 0,763 = 158,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахунки показують нижчий рівень температури $\theta_{ош}$ від середнього значення θ_s (за рахунок кращих умов тепловідводу в заготовку Z_α , ніж на зовнішній адіабатичній поверхні потоку C_γ).

12. Безрозмірний параметр довжини поверхні різання

$$\delta = 1 + h/l_z = 1 + 0,1 \cdot 10^{-3} / 69,032 \cdot 10^{-6} = 2,449.$$

13. Значення функції розподілу (17) при $\delta = 2,449$

$$F_h = \sqrt{\frac{\pi}{\ln \theta_s}} \cdot e^{1,449 \ln \theta_s} (1,0 - 0,99992) = 0,151.$$

14. Середнє значення функції температурного поля (18) на довжині h

$$F_{hm} = \frac{2}{5,393^{1,5} \cdot 1,449} [2,322(1,204 - 0,00455 \cdot 0,565) -$$

$$- 0,886(0,99903 - 2476,142(1,0 - 0,99992))] = 0,229.$$

15. Температура в кінці довжини h поверхні різання

$$\theta_h = \theta_{ош} \cdot F_h = 158,1 \cdot 0,151 = 23,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

16. Середня температура на поверхні різання (19)

$$\theta_{hm} = \theta_u \cdot F_{hm} = 158,1 \cdot 0,229 = 36,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновки

1. На основі рухомої системи проходження потоку металу через площину зсуву розроблена теплофізична модель розрахунку розподілу теплоти деформації і температури на поверхні різання заготовки.

2. Виведені формули розрахунку глибини n проникнення теплового потоку з площини зсуву в заготовку і коефіцієнта розподілу b^* теплоти деформації між стружкою і заготовкою. Параметри n і b^* обчислюються методом ітерацій з початковим застосуванням попереднього значення b' по спрощеному визначенню.

3. Виконано розрахунок температурного поля смугового швидкорухомого джерела з експоненціальним розподілом густини теплового потоку на площині різання. Отримано вираз для визначення середньоінтегральної температури на поверхні різання за межами дії теплового джерела деформації.

Список використаних джерел: 1. *Резников А.Н.* Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 200 с. 2. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с. 3. *Силин С.С.* Исследование процессов резания методами теории подобия. – Труды Рыбинского вечерн. технол. ин-та, №1. – Ярославль: изд. Верхняя Волга, 1966. – С.5 – 54. 4. *Силин С.С.* Методы подобия при резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296с. 6. *Карслоу Г.С., Егер Д.К.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488с. 7. *Силин С.С.* Расчет температурных полей при действии движущихся источников тепла. – /Инженерно-физический журнал, 1963. – Т. VI. – №12. – С.73–80. 8. *Егер Д.К.* Движущиеся источники тепла и температура трения. – Сб. перев. иностр. литер. «Прикладная механика и машиностроение.» – М.: Изд-во ИЛ, 1952. – №6. – С.22 –39. 9. *Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М.* Теория тепло- и массообмена. – М. –Л.: Госэнергоиздат., 1961. – 680 с. 10. *Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В.* Визначення коефіцієнтів форми швидкорухомих джерел теплоти при різанні. – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, вип. 26, 2010. – С.409–417. 11. *Брычков Ю.А., Маричев О.И., Прудников А.П.* Таблицы неопределенных интегралов: Справочник. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

Надійшла до редколегії 17.06.2013